

PIV 성능시험을 위한 표준실험장치 개발

성재용* · 도덕희† · 이석종** · 황태규***

Development of Standard Experimental Apparatus for PIV Performance Evaluation

Jaeyong Sung, Deog Hee Doh, Sukjong Lee and Tae Gyu Hwang

Abstract. An experimental apparatus for PIV performance evaluation has been developed. Standard uncertainty of a two-dimensional cross-correlation PIV system was investigated based upon the standard experimental apparatus, which was devised to model the rigid body rotating flows. For the systematic analysis of the uncertainty introduced by each component (algorithm, CCD camera, frame grabber) of the PIV system, standard images are fed into the component independently. The standard experiments show that 53% of the uncertainty in the present PIV system results from the frame grabber but the errors from the algorithm and digital camera are ignorable.

Key Words : Standard Experimental Apparatus(표준실험장치), Cross-Correlation PIV(상호상관 PIV), Standard Uncertainty(표준불확도)

1. 서 론

입자영상상속계(PIV)⁽¹⁾는 하드웨어 및 소프트웨어의 구성에 의하여 완성되는 시스템형 계측기이다. 따라서 다양한 하드웨어와 다양한 소프트웨어가 존재할 수 있는데 현재 이렇다할 시스템 구성의 기준이 정리되어 있지 않다. 즉 PIV 시스템이 하나의 계측시스템으로 존립하기 위해서는 시스템을 구성품들이 전체 시스템의 계측에 미치는 영향을 분석하고 평가하는 것이 필요하다.

Keane & Adrian⁽²⁾이 상호상관 PIV 해석 기법을 이론적으로 정립한 이후 광학 및 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 PIV 기술도 급속히 발전하였다. 현재에는 고속⁽³⁾, 고정밀⁽⁴⁾의 2차원 PIV를 넘어서 3차원 계측을 위한 Stereoscopic PIV⁽⁵⁾와 Holographic PIV⁽⁶⁾ 그리고 응용분야에 따라 Micro PIV⁽⁷⁾와 Two-phase PIV⁽⁸⁾ 등

다양한 형태로 발전하고 있다. 기술 발전에 힘입어 이미 2차원 PIV를 비롯하여 몇몇 기술들은 상용화된지 오랜 시간이 지났으며, 다양한 종류의 시스템이 상업적으로 활용되고 있다. PIV 시스템은 최근 산업 전반에 이용되고 있는 열유체기기의 신제품 개발 및 성능 향상에 매우 필요한 장비로 자리매김 하고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 PIV 시스템의 성능 및 측정 불확도에 대한 표준적인 방법이 정립되어 있지 않아 PIV 시스템에 대한 비전문적 지식을 가진 사용자들로 하여금 많은 어려움을 겪게 한다.

본 연구에서는 이러한 관점으로부터 기본적인 표준 실험장치를 제안하고 이 실험으로부터 계측시스템 구성요소들에 대한 계측불확도를 평가하고자 한다. 표준 성능시험장치의 기준은 개별 유동의 다양성에서 발생할 수 있는 오차를 배제한 순수 시스템 자체의 성능평가가 되어야 하며, 각 시스템 구성요소들이 전체 계측 오차에 미치는 영향도 정량적으로 평가되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 2차원 상호상관 PIV 시스템의 구성요소인 알고리즘, 카메라, 영상 그래픽이 가지고 있는 계통적 불확도를 평가하고 표준실험을 통하여 전체 시스템의 불확도를 측정하여 비교 분석하고자 한다.

†한국해양대학교 기계공학과
E-mail : doh@mail.hhu.ac.kr

*서울산업대학교 기계공학과

**서울산업대학교 에너지환경대학원

***Univ. of Tennessee, Dept. of Mech., Aerospace & Biomedical

2. 표준실험과 계측오차 평가방법

PIV 시스템은 소프트웨어부와 하드웨어부로 나뉘어진다. PIV 계측에 의한 측정 불확도를 평가하기 위하여 본 연구에서 소프트웨어는 현재 가장 많이 쓰이고 있는 계조치(영상의 픽셀당 밝기 정보)상호상관법을 대상으로 하였고 하드웨어는 누구나 손쉽게 구성할 수 있는 요소를 대상으로 하였다. 즉 하드웨어 시스템은 표준영상을 디지털 및 아날로그로 변환시킬 수 있는 변환장치(DAC 100)와 디지털 캠코더 및 아날로그 비디오, 디지털 캠코더의 영상을 받아들이는 8 bit 영

상 그래버로 구성하였다. Fig. 1은 이와 같은 PIV 시스템의 구성요소에 대한 계측오차를 정량적으로 추적하기 위한 개념도를 나타낸 것이다. PIV에 의한 실험 계측 불확도는 실험대상과 실험환경에 따라서 달라진다. 따라서 우선적으로 실험대상과 환경에 영향을 받지 않는 수치적 표준가상영상(standard virtual image)을 이용하여 영상입력부(카메라), 영상기록부(영상 그래버) 및 PIV 알고리즘에 의한 계통오차를 추정하고자 하였으며, 이 때 표준가상영상의 구현은 강제 회전 운동에 의한 것으로 정하였다. 먼저 강제운동을 모사하는 회전원판의 운동을 표준 실험 대상으로 정하고

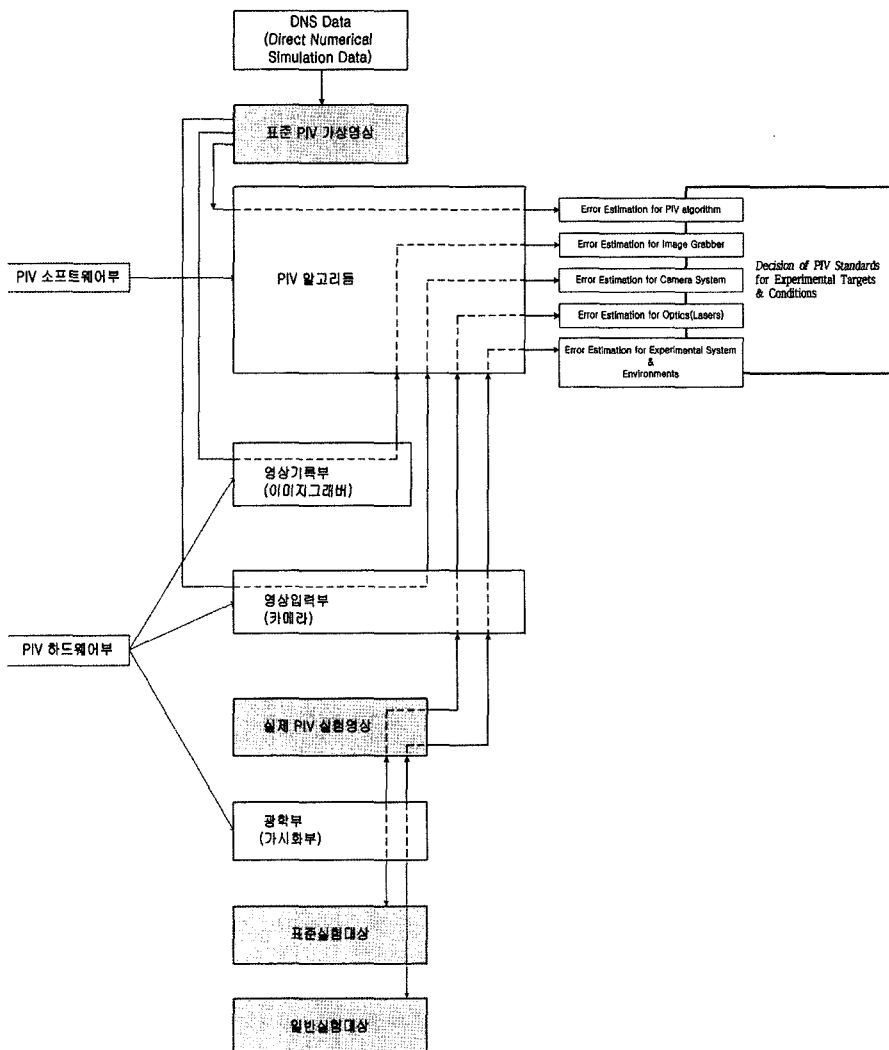


Fig. 1. Schematic diagram for experimental uncertainty estimation according to the components of the PIV system.

이에 대한 수치데이터를 작성한다. 이 수치데이터로부터 표준영상을 만들고 이 표준영상을 이용하여 추적 입자들의 개수(밀도), 입자의 직경크기 및 계산을 위한 상관영역의 크기에 따른 표준가상영상을 만들어 이들 각각에 대한 평가를 실시하였다. 표준가상영상은 이전 연구⁽⁹⁾에서 사용했던 방법을 채택하였다.

PIV시스템 구성요소에 대한 계통적 측정불확도 평가는 표준실험을 통하여 얻어져야 하며, 본 연구에서는 이를 위한 표준 성능시험장치를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 표준 성능시험장치는 회전원판 상에 추적입자(hollow glass, 직경=0.2 μm)를 도포한 다음 이에 대하여 광원(레이저, Nd-Yag)으로 조사된 유동장을 형성하는 것으로 상호상관 PIV로 실 계측하여 그 표준불확도를 평가하도록 하였다. Fig. 2는 실험장치의 개요를 나타낸다. 사용된 원판은 직경 120 mm의

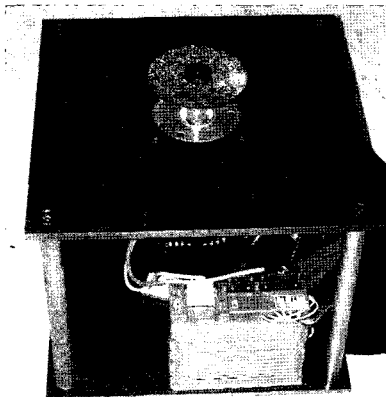
컴퓨터용 표준 콤팩트디스크(CD)이며, 레이저 광원에 의한 난반사가 발생하지 않도록 무광흑색도료로 도포하고 그 표면위에 추적입자를 도포하였다. 한편, 도포된 입자들의 크기가 전 영역에 골고루 분포되지 않을 수 있으나 본 연구에서는 회전상태에서 여러번 반복하여 결과를 얻는 관계로 입자들의 분포에 따른 영향을 무시할 수 있다. 디스크를 구동하기 위한 전동기는 회전 정밀도가 높은 서브모터(LG-OTIS, LF03)를 사용하였으며, 회전속도 조정을 위하여 드라이브(LG-OTIS, 6004)를 사용하였다. 또한 사용된 모터제어는 서보 속도제어로 정확도는 전기적 제어에 의한 것이며 99%이상 유지되었다. 측정을 위한 회전판의 무게는 매우 가벼운 CD판의 무게에 가까운 관계로 모터에 대한 부하 관성력은 무시할 수 있어서 모터의 회전수에 대한 오차는 무시하였다.

3. 구성요소별 계통오차 평가

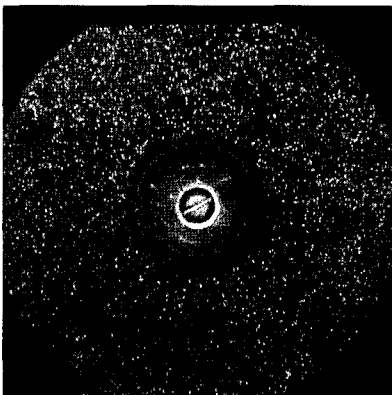
3.1 계조치 상호상관 알고리즘 평가

본 연구에서 사용된 시스템에 있어 계조치 상호상관 알고리즘의 불확도를 구하기 위하여 표준 가상영상을 이용하였다. 동일한 정지영상 두 장에 대하여 상호상관알고리즘으로 상관계수를 계산함으로써 알고리즘 자체에 대한 오차를 평가하였다. 이 때, PIV 알고리즘을 적용하기 위하여 이동거리를 8 pixel로 하여 이 범위 내에서 상관값을 구하도록 하였으며, 입자의 개수, 입자의 직경 및 상관영역의 크기에 따른 계측오차를 평가하였다.

720×480 pixels 크기의 가상영상에 대하여 입자의 개수를 10,000, 15,000, 20,000 개로 바꾸고 입자직경의 크기를 0.1-1.0, 1.0-1.5 pixel의 두 가지 분포를 지정하였다. 회전각도는 1.0°, 2.0°로 지정하였으며, 상관영역의 크기는 17, 33, 65 pixel로 변화시켰다. 이상의 총 36가지 반복시험에 대하여 ISO/IEC 규격⁽¹⁰⁾에 따라 측정에 있어서의 측정불확도(measurement uncertainty) 산정법에서는 측정오차를 계통오차(bias error)와 우연오차(random)로 나뉘고 있으며 95%신뢰도 및 99% 신뢰도 구간에서의 산정법을 측정횟수에 따른 데이터들에 대한 통계적 처리에 의거하여 얻어내는데, 본 연구에서의 계통오차는 0.00218 pixel이었으며, 표준불확도(standard uncertainty)는 0.00136 pixel로 나타났다.



(a) whole system



(b) particle image of a rotating disk

Fig. 2. Standard experimental apparatus devised to model rigid body rotating flows.

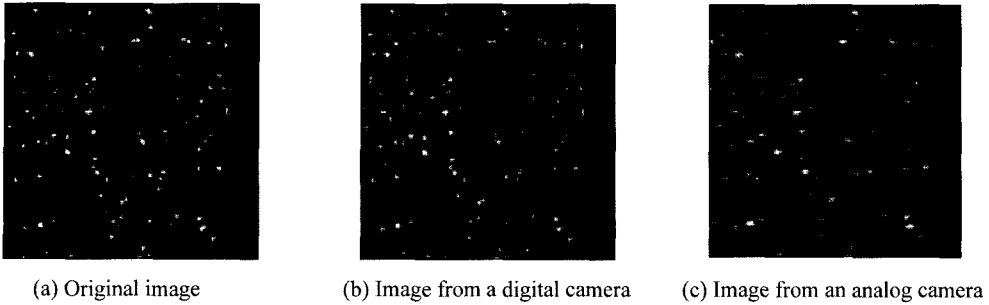


Fig. 3. Standard image and its conversion by a CCD camera.

3.2 영상입력부(카메라) 평가

영상입력부 중에서 카메라에 의한 계측 불확실성 영향을 분석하고자 표준가상영상을 총 120장을 제작하였다. 이 때, 영상의 크기 720×480 pixels, 디스크 대 표길이 680 pixel, 입자수 12000개, 평균입자 반경 1.2 pixel, 평균영상밝기 170, 레이저 두께 0.7 pixel로 지정하였으며, 회전각도를 1°, 1.5°, 2.0°로 변경하였다. 총 120장의 표준가상영상을 디지털 카메라와 아날로그 카메라를 거쳐서 영상을 획득하고 원래의 가상영상과 비교하였다.

Fig. 3은 원시 가상영상(Fig. 3(a))을 Doh 등⁽¹¹⁾이 적용한 소프트웨어 기반 PIV가상영상 작성법을 적용하여 얻어낸 다음, 이를 디지털 또는 아날로그 카메라를 거친 후의 영상에 있어 회전원판의 임의 끝단을 확대한 영상이다. 그림에서 알 수 있듯이 디지털 카메라를 통한 영상을 나타내는 Fig. 3(b)는 거의 동일하게 복원되었으며, 아날로그 카메라(DAC 변환기의 D/A변환을 한 결과)를 통한 영상은 Fig. 3(c)와 같이 잡음과 함께 영상이 이동(shifting)된 것처럼 나타났다. 이는 아날로그 카메라를 PIV 시스템의 구성요소로 사용할 경우 A/D변환에 따른 영상의 jittering에 의한 계측오차로 판단된다.

두 가지 종류의 카메라에 의해 획득된 영상으로부터 속도벡터를 계산하여 계통오차와 표준불확도를 계산하였다. 디지털 영상(카메라)에 의한 계통오차는 0.00056 pixel, 표준불확도는 0.00513 pixel로 거의 무시할 수준이었으며, 아날로그 영상(카메라)에 의한 계통오차는 2.37064 pixel, 표준불확도는 0.13756로 매우 크다. 아날로그 영상에 의한 계통오차는 유동장의 영상에 대하여 일정방향으로 이동되는 양이므로 보정함으로써 오차를 없앨 수 있거나 아니면 디지털카메라

를 사용함으로써 없앨 수 있음을 의미한다. 실제로 두 장의 연속된 영상을 아날로그영상으로 변환하여 계산하여 본 결과 영상이동에 의한 영향은 적었다. 그러나 안정한 시스템을 위해서는 디지털카메라 사용이 권장된다.

3.3 영상입력부(영상 그래버) 평가

720×480 해상도를 가지는 표준가상영상을 8 bit 영상 그래버로 획득함으로써 영상입력부 중에서 영상 그래버에 의한 계통오차를 평가하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 영상 그래버는 512×480 pixels의 해상도를 가지고 있으며, 세로 해상도는 480 pixel로 동일하나 가로 방향은 해상도가 차이가 난다. 이는 가로와 세로 방향의 장방비 불일치로 나타나며, 세로방향의 영상형상에는 변화가 없었으나 가로방향의 경우 0.895 배로 줄어들었다. Fig. 4에서는 표준가상영상(Fig. 4(a))과 이 표준가상영상을 8 bit 영상 그래버로 획득한 결과의 영상(Fig. 4(b))을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 영상이 심하게 일그러져 있음을 알 수 있다. 이와 같이 카메라의 수평해상도와 영상 그래버 수평해상도 사이에 차이가 발생하면 PIV 의한 실 계측 시에는

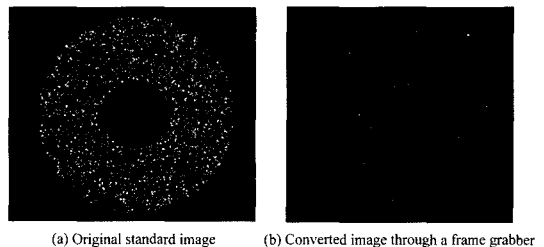


Fig. 4. Standard image and its conversion by a frame grabber.

Table 1. Evaluation conditions on the virtual standard (reference) image

particle number	particle diameter [pixel]	rotation angle	correlation size (N×N) pixel	data No.
10000	0.5~1.0	1.0°	17	1
			33	2
			65	3
		2.0°	17	4
			33	5
			65	6
	1.0~1.5	1.0°	17	7
			33	8
			65	9
		2.0°	17	10
			33	11
			65	12
15000	0.5~1.0	1.0°	17	13
			33	14
			65	15
		2.0°	17	16
			33	17
			65	18
	1.0~1.5	1.0°	17	19
			33	20
			65	21
		2.0°	17	22
			33	23
			65	24
20000	0.5~1.0	1.0°	17	25
			33	26
			65	27
		2.0°	17	28
			33	29
			65	30
	1.0~1.5	1.0°	17	31
			33	32
			65	33
		2.0°	17	34
			33	35
			65	36

0.895의 역수인 1.117을 곱해주어야 함을 의미한다. 이 계수는 모든 영상 그래버에 적용되는 것은 아니므로 카메라의 해상도와 영상 그래버와의 해상도가 서로 다를 경우 가로 세로 방향으로의 장방비 교정을 해주어야 함을 의미한다. 최근에는 디지털 카메라 전용의 그래버가 제공되므로 전용의 그래버를 사용하면 이와 같은 오차는 발생하지 않는다.

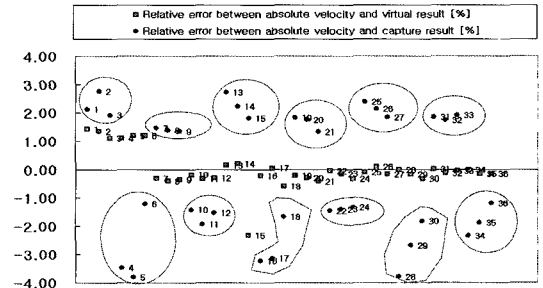


Fig. 5. Relative errors to the true velocity, which result from a frame grabber.

한편 본 연구에 적용된 8 bit 영상 그래버는 인터레이스(interlace) 저장방식인 관계로 하나의 프레임(frame)영상에 대하여 1/60초 시간차를 가지는 두 장의 필드영상(field image)으로 저장된다. 따라서 속도 벡터장을 계산하기 위하여 두 장의 필드영상(odd & even fields)으로 분리하여 상호상관알고리즘의 계산에 적용하였다. 프레임영상으로부터 필드영상 분리에 하나의 완전한 필드영상을 얻어내기 위해서는 영상 보간이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 기수필드(odd field) 영상의 획득은 얻고자 하는 기수필드의 상하에 있는 우수필드(even field) 영상을 산술평균하여 얻었다⁽¹²⁾. Table 1은 입자의 개수, 입자직경, 회전각, 상호상관계산에서의 상관영역크기를 변화하여 구성된 36가지 경우에 대한 성능평가 조건을 나타내는데, Fig. 5는 이들 36가지에 대한 원판의 한 지점(X = -161 pixel)에서의 Y축 상의 이론상 이동량에 대한 계통오차를 나타낸 것이다.

그림에서 사각형으로 표시된 점들은 각 조건에서 작성한 표준가상영상에 대하여 영상 그래버를 통과시키기 전의 영상을 상호상관알고리즘으로 계산한 결과를 나타내며 원형으로 표시된 점들은 영상 그래버를 통과한 후의 영상을 상호상관알고리즘으로 계산한 결과를 나타낸다. 영상 그래버를 통과한 후의 영상에 의한 오차가 상대적으로 크음을 알 수 있다. 그림에서 음의 값으로 나타난 점들은 회전각도 2°인 경우로 속도가 이론속도보다 적게 나타났으며, 양의 값으로 나타난 점들은 회전각도 1°인 경우로 이론속도보다 큰 값을 보이고 있다. 한편, 회전각에 따라 다른 분포를 보이는 것은 상호상관 계수의 계산에 있어서 탐색영역 설정값에 따른 공간해상도의 차이로 기인하는 것으로 사료된다. 다시 말하면, 오차평가를 위해서는 탐색영

역의 파라미터를 일정범위 내에서 일관되게 일정히 유지하여야 하는데(본 연구에서는 5~10 pixel, 레이저의 시간간격은 일정히 유지상태), 이렇게 되면 1°일 때는 과도의 값이 2°일 때는 과소의 값이 나타나게 됨을 의미한다. 이는 이의 중간 값인 1.5°로 되도록 한 실험에서는 그 차이가 적게 나타날 것을 암시한다.

이상의 총 36가지 경우에 대하여 영상 그래버 통과 전의 값과 통과 후의 값을 비교함으로써 순수한 영상 그래버에 의한 오차를 구할 수 있다. 그 결과 계통오차 및 표준불확도가 각각 -0.03904 pixel과 0.11456 pixel이었다.

4. 표준실험을 통한 계측 불확도 해석

표준실험에 의한 PIV 시스템의 계측 불확도를 평가하기 위하여 본 연구에서는 광원으로 Nd:Yag 레이저를 사용하였고, 1k x 1k 해상도를 가진 디지털 카메라를 동기장치(LC880)로 동기 시켰으며 이를 이용하여 두 시각차의 영상을 얻었다. 이 때 시간차는 회전원판 최외각의 이동량이 5~10 pixel 이내가 되도록 조절하였다. 상호상관계산을 위한 탐색거리는 8 pixel로 하였다. 실험 변수로는 회전수를 100, 200, 300 rpm, 광원출력을 17, 22, 26 mJ, 상관영역 크기를 17, 33, 65 pixel로 하였다.

이상의 총 27가지 경우의 수에 대하여 표준실험을 수행하고 그 이론값에 대한 상대오차를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 나타난 번호는 회전수, 광원출력, 상관영역 크기 순으로 배열하고 우측 변수값부터 증가시키면서 부여되었다. 1~9번의 데이터는 회전수가 100 rpm, 10~18번은 200 rpm, 19~27은 300 rpm일 때의 결과를 나타내는데, 회 전수에 따른 상대오차의 변

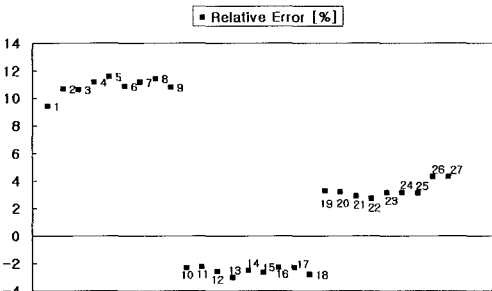
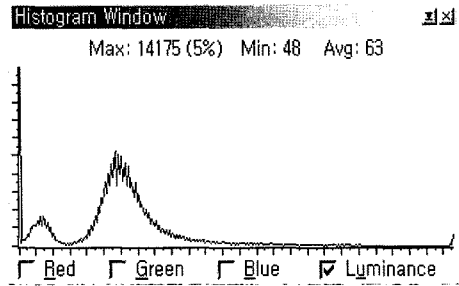
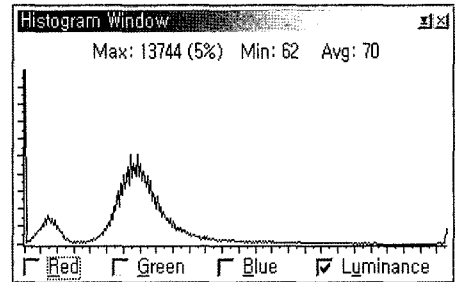


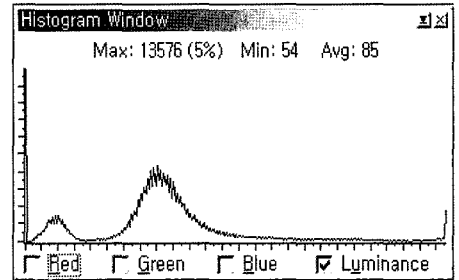
Fig. 6. Relative errors to the true velocity.



(a) 7 mJ



(b) 22 mJ



(c) 26 mJ

Fig. 7. Variation of the image histogram according to the laser powers.

화의 변화폭은 크며, 광원의 출력 및 상관영역크기에 따른 상대오차 영향은 회전수에 비하여 적었다. 회전수가 100 rpm일 때, 다른 두 회전속도에서 보다 오차가 상대적으로 크게 나타나는 것은 동일한 탐색영역의 크기에 비하여 이동거리가 적은 관계로 공간해상도가 낮아지게 된 것에 기인하는 것으로 사료된다. Fig. 7은 광원출력을 변화시켰을 때 회전원판의 영상 밝기에 대한 히스토그램분포를 나타낸다. 대체적인 분포형태는 거의 유사하며, 다만 레이저 파워가 증가함에 따라 평균밝기가 증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6에서 살펴본 바와 같이 평균밝기 변화가 상호상관계측 결과에

Table 2. Standard uncertainty of the present PIV system by standard experiments.

Source of uncertainty	Bias error	Standard uncertainty	Percent (%)	Degree of freedom
Cross-correlation algorithm	0.00218	0.00136	0.63	35
CCD camera (Digital)	0.00056	0.00513	2.38	119
Frame grabber	-0.03904	0.11456	53.14	35
Standard experiment	0.12826	0.21557	100	26

미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

Fig. 6의 데이터로부터 얻은 본 PIV 시스템의 계통 오차는 0.12826 pixel이었으며, 표준불확도는 0.21557 pixel이었다. 이 불확도는 유동의 3차원성, 유동 내 속도구배 등 유동장 자체에서 발생하는 불확도 요소가 완전히 배제된 순수한 PIV 시스템 자체의 불확도이다. 표준실험에서는 시스템의 각 구성요소(알고리즘, 카메라, 영상 그래버 등)가 가지고 있는 불확도가 합쳐져서 나타나며 Table 2에서 구성요소별 불확도와 표준실험에 의한 불확도를 비교하였다. 표준실험에 의한 불확도를 100%라고 하였을 때, 각 구성요소별 불확도 중 영상 그래버가 53.14%로 가장 영향이 컸고, 알고리즘과 디지털 카메라의 영향은 거의 무시할 수 있는 수준이다. 표준실험에서 나머지 약 40% 정도의 불확도는 광원, 광학적 정렬의 오차 등이 내포되어 있다.

5. 결 론

2차원 상호상관 PIV 시스템에 대한 표준실험장치를 개발하고 실제 성능시험을 통하여 그 측정 불확도를 평가하였다. 유동장 자체에서 발생하는 불확도 요인을 완전히 배제한 상태에서 본 연구에서 사용된 PIV 시스템은 계통오차가 약 0.13 pixel이며, 표준불확도는 약 0.22 pixel이다. 표준실험에 의한 불확도의 약 53%는 영상 그래버에 의해 발생되었으며, 알고리즘 및 디지털 카메라에 의한 불확도는 무시할 수 있다.

본 연구에서 개발한 표준실험장치는 다양한 하드웨어 및 소프트웨어 구성요소를 가진 타 PIV 시스템에 대해서도 동일하게 적용함으로써 각 시스템이 가지고 있는 성능을 비교하는데 매우 유용할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J., 1998, Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag, New York.
- 2) Keane, R. D. and Adrian, R. J., 1992, "Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images", Applied Sci. Res., Vol. 49, pp. 191-21.
- 3) Bi W,-T Sugii Y, Okamoto K, Madarame H, 2003, "Dynamic PIV Measurements of the Near-Field Flow of a Planar Jet", Proc. 5th Int. Symp. Particle Image Velocimetry, Busan, Korea.
- 4) Hart, D. P., 1999, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation", J. Visualization, Vol. 10, pp. 1-10.
- 5) Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z-C, 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry", Meas. Sci. Technol., Vol. 8, pp. 1441-1454.
- 6) Meng, H. and Hussain, F., 1995, "In-Line Recording and Off-Axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry", Appl. Opt., Vol. 34, pp. 1827-1840.
- 7) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow", Exp. Fluids, Vol. 27, pp. 414-419.
- 8) Lindken, R., Gui, L. and Merzkirch, W., 1999, "Velocity Measurement in Multiphase Flow by Means of Particle Image Velocimetry", Chem. Eng. Tech., Vol. 22, pp. 202-206.
- 9) Lee, S., Choi J., Sung, J., Hwang, T. G. and Doh, D. H., 2005, "Uncertainty Analysis of Cross-Correlation Algorithm based on FFT by PIV Standard Images", KSV J., Vol. 3, No. 2, pp. 71-78.
- 10) ISO/IEC, 1993, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (First edition).
- 11) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, K. R., Cho, Y. B., Saga, T. and Kobayashi, T., 2002, "Development of Genetic Algorithm based 3D-PTV Technique", Journal of Visualization, Vol. 5, No.3, pp. 243-254.
- 12) Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T., Tsuda, N., 1991, Development of a Real-time Velocity Measurement System for High Reynolds Fluid Flow using a Digital Image Processing Design, Proc. of ASME FED, Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.), Vol. 128, pp.9-14.